

狭い水平矩形縮小流路内にある液体ブリッジの研究* (気液界面形状と微小液体の内部流れの測定)

太田 淳一^{*1}, 生水出 淳史^{*2}
村井 祐一^{*1}, 山本 富士夫^{*3}

A Study on Liquid Bridge in a Horizontal Narrow Converging Channel (Shape of Gas-Liquid Interface and the Internal Velocity Field)

Junichi OHTA^{*4}, Atsushi SHOZUDE,
Yuichi MURAI and Fujio YAMAMOTO

^{*4} Fukui University, Dept. of Mechanical Engineering,
3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui, 910-8507 Japan

This paper describes the gas-liquid interface shape and the internal flow field of a liquid bridge that is placed to bridge the cross-section of a horizontal narrow rectangular converging channel made of glass with a gap size of 1.2 mm and a converging angle of 2.97°. Such a liquid bridge is moved to the smaller cross-section by surface tension. Liquid bridge are observed and transported in semi-scale channels and also in gas-liquid separator under a microgravity condition. Thus, it is important to understand the liquid bridge behavior from point of view of semi-scale flows dominated by surface tension. In the present study, a liquid bridge made of ethyl alcohol or mixture of water and ethyl alcohol as the liquid was viewed from the top and the side. (1) The internal flow fields of the liquid bridge in the side view were quantitatively measured by the brightness distribution cross-correlation method, i.e. PIV (Particle Imaging Velocimetry). (2) The gas-liquid interface shape was expressed using Fourier factors, and the feature was clarified. (3) Effects of various parameters on the liquid bridge behavior were examined.

Key Words: Liquid Bridge, Interface Flow, Visualization, Surface Tension, Porous Media, PIV

1. 緒 言

地球重力場で水平の狭い矩形拡大流路(縮小流路)内の液中にトラップされた気泡挙動は、表面張力によってその現象がおもに支配されるという理由で、微小重力場におけるそれと似ている。そこで、前報⁽¹⁾では微小重力場における気泡分離の基礎研究として、地球重力場で水平の狭い矩形拡大流路(縮小流路)にトラップされた気泡挙動を測定し、すきま厚さ、流路開き角、気泡体積の大きさの移動速度に及ぼす影響を調べた。続報⁽²⁾では、気泡の挙動について、そのメカニズムを明らかにし一次元的なモデルによって、実験と定性的に一致する計算結果が得られた。本研究は前報における気相と液相を入れ替えた一連の研究であり、流路をふさぐ液滴(本研究では液体ブリッジと称し、以下「LB」という略称を用いる)を扱う。LB挙動は、気液分離装置や化学プロセス⁽³⁾における微細流路内のセミスケール(50 μm ～数 mm 程度)の問題として関心が

もたれている。本報告は、表面張力が支配的なセミスケールのLB流れを扱う基礎研究として位置付けられる。

従来、LBに関する基礎研究の一部に、流路内の気液界面形状、前進接触角と後退接触角、固体表面と気液界面の接触する位置の近傍の微細な界面形状の研究がある。これらについて、以下、順に述べる。なお、「気液界面」を「界面」と、巨視的な観察から気液界面が固体表面と接触する場所を「接触点」と称する。多孔質媒体をモデル化した微細流路内の気液二相流では、LBの生じることが明らかにされた⁽⁴⁾。水-油二相流では、断面積の縮小と拡大を繰返す波状流路内に油がLBとして存在することがある。このLBについて、前進接触角、後退接触角、円弧の界面形状を与えた一次元解析により、LBを押し出す圧力が計算された⁽⁵⁾。鉛直姿勢の管内に静止するLBの接触角が測定され、これらとLB長さを与えて界面形状が計算された⁽⁶⁾。微小重力場において円管内の液柱がポンプ駆動で上昇する場合と表面張力駆動により上昇する場合について、両者の界面形状の違いが示された⁽⁷⁾。文献(7)で、前進接触角はKistlerの文献にある実験式⁽⁸⁾に合うことが確認され、上昇する液柱の内部流れを可視化してスケッチしている。前進接触角と後退接触角

* 原稿受付 2001年9月20日。

^{*1} 正員、福井大学工学部(☎910-8507 福井市文京3-9-1)。

^{*2} 新明和工業(☎663-8122 西宮市小曾根町1-5-25)。

^{*3} 正員、フェロー、福井大学工学部(☎910-8507 福井市文京3-9-1)。

E-mail: ohta@mech.fukui-u.ac.jp

については、文献(8)でレビューされた。乾いた固体表面を前進する接触点近傍の微細な界面形状を予測する式が与えられた⁽⁹⁾。また、ぬれた固体表面の場合、移動する接触点と固体表面の間には厚さが分子レベルかあるいは数 μm の液膜が存在している。これらの場合について、接触点近傍における界面形状の測定値とモデルによる予測値との比較検討がなされた⁽¹⁰⁾。しかし、このモデルの適用条件はまだ狭い。

以上から、LBの研究のためには、界面形状、接触角、壁面摩擦を評価するための内部流れの実験データが必要となる。従来、接触角の研究とその実験式は多く、LB挙動は一次元的な扱いである。しかし、LB内部の二次元速度分布と界面形状のデータは重要であるにもかかわらず、本研究で示すもの以外に著者らは知らない。本報告では、前報と同一形状の水平に置かれたガラス製の矩形縮小流路(流路高さ1.2 mm)内でぬれた流路壁面に接して動くエタノールのLBを対象とする。本研究では新しく二次元の実験として、次の事項を明らかにすることを目的とする。(1) 界面形状、(2) LBの流路高さ1.2 mmにおける内部速度分布を測定するためのPIV(Particle Imaging Velocimetry)の適用、(3) 開き角が約 3° で幅が1~20 mmの縮小流路にあるLBのフォトクロミックダイ法による可視化観測の適用、(4) LBの投影面積、初期位置、エタノールと水の割合がLB挙動に与える影響。なお、本実験のCa数は $(1\sim 3) \times 10^{-4}$ である。

おもな記号と略称

- DI: 下流側気液界面(Downstream Interface)
- h : 流路高さ(すきま高さ)
- LB: 液体ブリッジ(Liquid Bridge)
- S : 上方から見た液体ブリッジの投影面積
- UI: 上流側気液界面(Upstream Interface)
- U_i : 液体ブリッジ内部の軸方向絶対液速度
- U_u : 上流気液界面速度
- X : 流路壁面を延長した線の交点からの軸方向距離(図3)
- X_u : 上流気液界面位置(図3)
- X_d : 下流気液界面位置(図3)
- X_{d0} : 初期下流界面位置

2. 実験装置と方法

図1の上部に狭いすきまを有する矩形縮小流路(以下、試験流路と称する)の上面図とその下部に側面図を示す。上面の1枚の石英ガラスとその他の3枚のパ

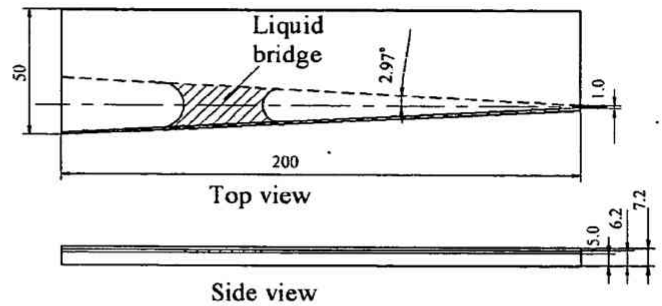


Fig. 1 Rectangular converging channel (test channel)

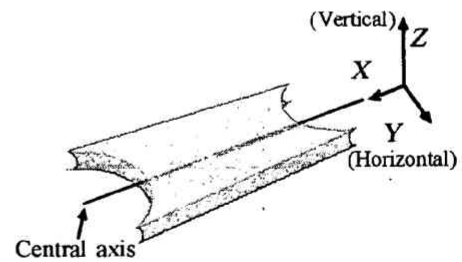


Fig. 2 Liquid bridge and its coordinate system

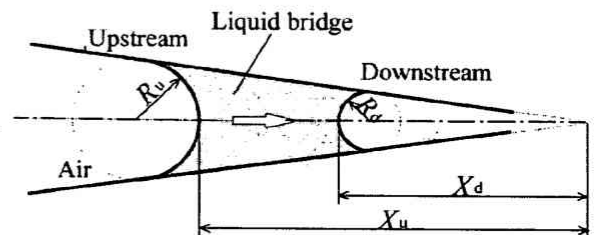


Fig. 3 Definitions of symbols

イレックスガラス板に囲まれている試験流路は、開き角 2.97° 、流路高さ1.2 mmであり、流路の上流と下流は大気に開放されている。その3枚のうち1枚のガラス板は厚さ1 mmで界面を側面から観察するために流路側壁として取付けられている。着目しているLBは、図1中の斜線部分で示されており、流路側壁に接している。LBは流路断面積の狭い方向に移動するので、流路断面積の広い側を上流、狭い側を下流と称する。略称として、上流側気液界面は「UI」、下流側気液界面は「DI」と表現する。試験流路の開き角については、パルプレスマイクロポンプの研究⁽¹¹⁾に採用されている拡大や縮小の微細流路の開き角が、 $2.65\sim 5.35^\circ$ であり、前報⁽¹²⁾との継続性を考慮して、約 3° を選択した。図2には、その流路壁面をすべて取り除いて見たLBおよび座標軸を示す。Z軸は鉛直上向きにとり、X軸は水平な流路方向にとり、Y軸は水平方向でX軸に垂直な方向にとる。流路断面の中心を通りX軸に平行な軸を「流路中心軸」と称することにする。使用する各変数の定義を図3に示す。

図3のようにLBの上流側界面位置を X_u 、同様にLBの下流側界面位置を X_d と定義する。本研究では前報と条件を合わせるために、液として市販の試薬1級エタノール(99.5)を使用した。実験は温度288~294 Kで行った。扱うCa数は、 $(1-3) \times 10^{-4}$ が選定された。これは表面張力と粘性抵抗がバランスしながら、LBが移動する主要な範囲である。これより大きなCa数だと、LBが不安定で形状が保持されにくい。また、Ca数が 10^{-5} 以下では、接触角が固体表面粗さやわずかな汚れに依存する⁽⁸⁾ので、現象を再現することが難しい。

本研究のLBは測定空間が小さいので、従来のLDV(Laser Doppler Velocimetry)やホットワイヤ流速計を適用することは困難である。それでPIVを採用する。LBの内部速度を測定するための実験装置を図4に示す。これは試験流路(図1)、水平調整台、光学系、カメラからなっている。実験手順は次のとおりである。(1) 図4の水平調整台上に洗浄された試験流路を置いて水平になるように調整する。(2) 流路壁面が試験液でぬれた状態で、トレーサ粒子(以後、「粒子」と称する)を混入させた試験液を注射器により流路に注入しLBを形成する。(3) 事前にLBを移動させ、粒子を撮影してベローズを付けた高速ビデオカメラの焦点を合わせる。(4) 試験流路を静かに傾け、初期DIの位置 X_{d0} にLBを移動させ停止させる。(5) LBが可視部に現れる直前に、出力1.5 Wのアルゴンイオンレーザーによって作られた厚さ約1.5 mmのレーザーライトシートを上方からLBの流路中心軸を含むX-Z断面に照射する。(6) シャッタースピード1/1 000 s、フレーム速度120 fpsの高速ビデオカメラで内部流動を撮影する。

290 Kにおけるエタノール液の比重が0.79であることから、粒子は、直径5~20 μm 、真比重0.80のものを選定し、さらに液中で24 hなじませ中立浮遊するものだけを使用した。LBの移動速度は、粒子濃度が高い場合、界面や液膜に粒子の存在する確率が高く

なり界面の曲率半径に分布ができて、粒子を含まない場合と異なることが予想される。そこで、予備実験を行い、粒子の質量濃度が0.01%の場合と粒子を混入しない場合とではLBの移動速度は、同じであることを確認した⁽¹²⁾。したがって、粒子質量濃度を0.005%としてPIV用の実験を行った。微小領域のPIV計測では、粒子のブラウン運動が測定値に及ぼす誤差が問題となる。流路高さ5 μm の内部速度分布がPIVによって測定されていて、相対誤差は次式で評価されている⁽¹³⁾。

$$\text{error}_B = \frac{1}{U_i} \sqrt{\frac{2D}{\Delta t}}$$

ここで、 D は拡散係数、 Δt は画像取込みの時間間隔、 U_i は代表速度である。誤差は、この式により評価すると、最大で 0.75×10^{-3} となった。これは本研究の他の誤差より小さいので、無視できる。

上面と側面から見たLBの界面形状は透過光の条件でベローズを付けたCCDカメラによって撮影された。CCDカメラと高速ビデオカメラのレンズのDT値(歪曲収差)を測定した。その結果、両者とも同程度で0.5%以下であった⁽¹²⁾。なお、撮影領域にLBが通る直前から数sだけレーザー光を照射した。その結果、X-Z面内の液速度分布が上下対称となったので、レーザーによる加熱の問題が無視できるとみなした。また、上側の流路壁面の液膜厚さをLBの上流側と下流側においてレーザーフォーカス変位計で測定した結果、14~16 μm であった。

タイムラインの可視化には、蛍光時間が長いのでフォトクロミックダイ法⁽¹⁴⁾を適用した。エタノールにフォトクロミクス物質である1,3,3-トリチルインドリノ-6'-ニトロベンゾヒリロスピラン(TNSBP)50 ppmを溶かした液を使ってLBを作った。紫外光はYAGレーザーの4倍波(波長266 nm)を使用した。この可視化の結果以外は、断らない限りエタノール液のLBの結果である。

3. 実験結果と考察

3.1 気液界面形状

3.1.1 LBの側面から見た界面形状 光学測定

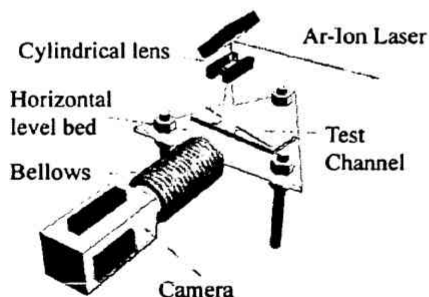


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

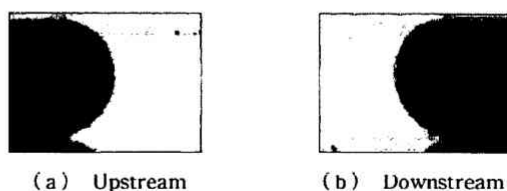


Fig. 5 Interfacial shape viewed from the side

系の予備検討として、矩形ガラス容器内の垂直平板間（距離 1.2 mm）にできる静止したエタノールの界面形状を測定した。これを理論で得られた界面形状⁽¹⁵⁾と比較した。その結果、光の反射の影響がある壁面近傍を除くと、両者の壁面間の対応する場所における界面位置（高さ）の差は平板間距離の 2.1% 以内であった。

側面から見た移動している上流側の界面形状の写真を図 5(a) に下流側のそれを図 5(b) に示す。写真から両者ともにほぼ同じ形状の円弧に見えるので、近似的に半径 0.6 mm の円弧とみなせる。これは Ca 数が小さく表面張力支配のためと考えられる。しかし、詳細に見ると円弧からわずかに変形していることもわかる。そこで、本研究ではフーリエ係数を LB 界面形状の測定結果の定量的表示と評価に用いる。界面形状をだ円で近似する方法もある。しかし、だ円近似は、その形状が重力で上下非対称になる場合、精度が低下すること、三つの係数だけで界面形状を表すために微妙な形が再現できないことから採用しなかった。

X - Z 座標において界面形状をその曲線に沿った距離 l を用いて、式 (1) の $f(l)$ で表現する。

$$f(l) = X(l) + iZ(l) \quad (0 \leq l \leq L) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 L は界面長さである。 $f(l)$ は複素フーリエ係数 C_n を用いて、式 (2) で表現できる。また、 $f(l)$ と C_n には式 (2) と式 (3) の関係のあることがよく知られている。ところで離散フーリエ変換によれば、フーリエ係数は式 (4) で求まる。

$$f(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp\left(\frac{2\pi i n l}{L}\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

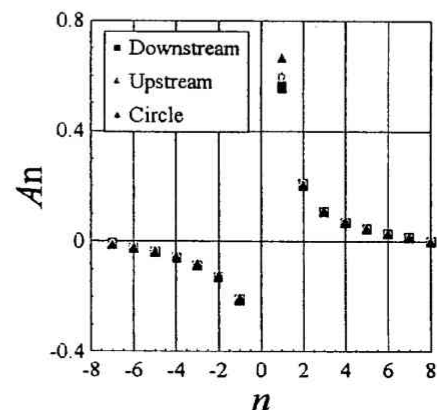
$$C_n = A_n + iB_n = \frac{1}{L} \int_0^L f(l) \exp\left(-\frac{2\pi i n l}{L}\right) dl \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$C_n = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} [X(k) + iZ(k)] \exp\left(-\frac{2\pi i n k}{L}\right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

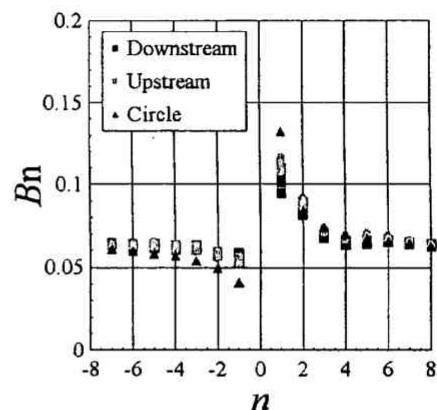
ここで、 K は界面座標の総数である。LB の界面座標と式 (4) から対応するフーリエ係数を求めることができる。界面座標決定では本研究で次のようにする。その座標を流路高さの半値で無次元化する。フーリエ係数は界面の向きで変化する。UI と DI 両方ともに図 5(a) の UI と同じ方向に画像としておく。界面と下側の流路壁面との交点を $f(0)$ として、これを無次元 X - Z 座標で $(X, Z) = (0, -1)$ になるよう画像を移動させる。反時計回りに $f(l)$ の界面座標を画像上で測定する^{**1}。得られたフーリエ係数 C_n を使って、測定された界面形状を復元できる。

n と A_n , B_n との関係を示すことにより、測定結果

を定量的に示し、界面形状の評価を行う。あらかじめ、種々のだ円に対して X - Z 座標で A_n と B_n の特徴を調べた⁽¹²⁾。例えば、だ円は、 A_1 の値が半円のそれ ($A_1 = 0.666$) と比較して小さく、他の係数がほぼ同じ場合、 X 軸方向が短軸で Z 軸方向が長軸となる。また、 A_1 の値が小さいほど短軸が短くなることがわかっている⁽¹²⁾。初期位置 $X_{a0} = 145 \sim 150$ mm から移動している LB が、位置 $X = 114 \sim 116$ mm で撮影された。側面から見た UI と DI に対応する界面形状のフーリエ係数 A_n と B_n のおのおのについて複数のデータを図 6(a), (b) に示し、界面形状を半円と仮定した場合のそれらも載せてある。図 6(a) より、DI と UI に対応する A_1 の値は半円のそれより小さいので、これらの形状は、 X 軸方向に短軸を有するだ円に似ていることがわかる。もし界面形状をだ円とみなすな



(a) Fourier coefficients A_n



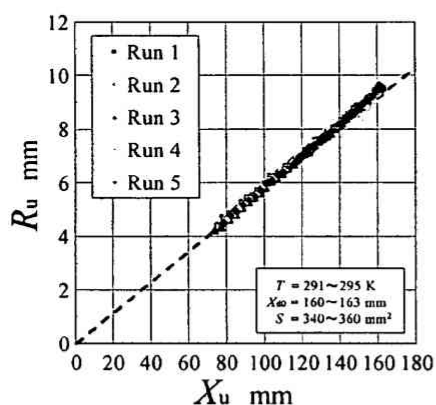
(b) Fourier coefficients B_n

Fig. 6 Fourier coefficients for the interface of the side view

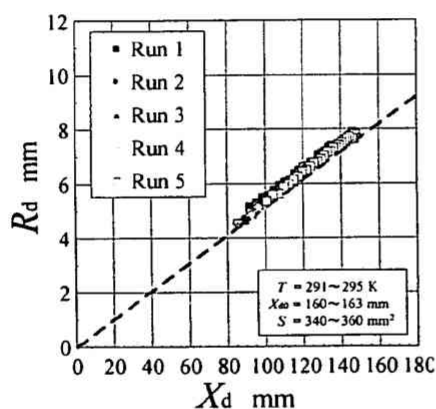
^{**1} 界面が同じ形状の場合、係数 A_0 と B_0 以外のフーリエ係数は界面位置の絶対座標に依存せず同じ値を有する。分割数 K の増加によってフーリエ係数は変化する。変化の小さくなった 16 の等分割をここでは用いた。離散フーリエ解析プログラムは文献 (16) にコードが公表されているサブプログラム four 1 を使用した。

ら, DI の A_1 の値が UI それよりも小さいので, DI の X 軸方向の半径は, UI のそれに比べさらに短いことがわかる。形状の違いは次の理由と考えられる。3・3・1 項の図 11 で述べるように LB 内部で, 液は X 軸方向に界面より速く流れる。したがって, 液は, UI 近傍で UI から離れるように, DI 近傍で DI に衝突するように流れるため円弧から変形し, UI と DI の形状は上述のような違いを示すと考えられる。したがって, 異なる開き角の縮小流路内にある LB についても界面形状は同様な傾向を示すだろう。なお, ここでは界面形状全体に着目しているの, 移動接触点近傍でその形状の測定精度は文献(9)ほど高くない。

3・1・2 LB の上面から見た界面形状 LB の上方から見た投影面積 $S=340\sim360\text{ mm}^2$, 初期 DI 位置 $X_{d0}=160\sim163\text{ mm}$, 測定位置 $X_u=75\sim160\text{ mm}$ の場合, エタノールの LB の上面から見た UI の形状を X - Y 平面で 5 回測定した。図 7(a) にはその界面形状を最小二乗法によって円近似した場合の曲率半径を記号で, 接触円モデル^{**2} によって求めたそれを波線で,



(a) Upstream interface



(b) Downstream interface

Fig. 7 Radii of curvature for UI and DI in the top view

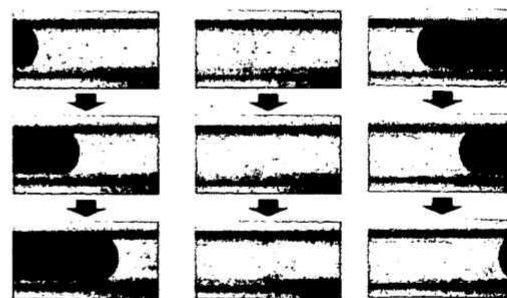
^{**2} 界面形状は, 縮小流路に入る最大の円(すなわち, 試験流路に接する円弧)になるというモデル⁽¹⁾。

で, 横軸に界面位置 X_u をとって示す。なお, 図 7(a) 中の Run 1~Run 5 は 5 回の各実験データを意味している。図 7(a) から, 得られた UI の曲率半径は実験ごとのばらつきが少なく, 接触円モデルによって求めたそれと一致していることがわかる。図 7(b) に DI に関する同様の結果を示す。測定された DI の曲率半径は, 測定範囲内で接触円モデルのそれより約 0.3 mm 大きいことがわかる。水とエタノールの混合液体の場合, 水の質量比の増加とともに DI 形状が半円の値 ($A_1=0.666$) に近づくことがわかった。この傾向は, UI についても同様であった。この理由は, 水の質量比の増加に伴い, 混合液体の表面張力が増加するためと考えられる。

3・2 フォトクロミックダイ法による LB の内部の流動の可視化

3・2・1 側面から見た内部流れ 図 8 は LB の上方から垂直に流路中心軸を通るように 1 本のレーザービームを照射した後, LB の側面から見た着色部の形状変化を示している。図 8(a) は UI 近傍における着色部の流れの写真であり, 経過時間の順に上から並べてある。(b) は UI と DI の X 方向中間位置における画像で, (c) は, DI 近傍のそれらである。界面近傍を除くと着色部の形は放物形をしていることがわかる。界面近傍の速度分布を着色部の移動量だけから測定することは, 多次元流れのため困難である。また, 2・1 節で述べたように他の方法による測定も困難なので, 3・3 節では PIV によって二次元速度場を調べる。

3・2・2 上面から見た内部流れ 図 9 は LB の上方からレーザーライトシートを Y 軸と平行に照射した後, LB 内部の着色部(タイムライン)の変化を上面から見た写真であり, 時間経過の順に上から並べてある。図 9(a), (b) から着色部が内部流れとともに移動している。したがって, それは流路側壁近傍を除くと Y 軸と平行のまま移動しており, 上面から見た流



(a) near UI (b) middle region (c) near DI

Fig. 8 Visualization of inner flow from the side using Photochromic dye activation

れは側面から見たそれと異なることがわかる。一方、図9(c)の1枚めで着色部はDIに衝突した後、2枚めと3枚めでDI形状に似たその残ることが示されている。これについては3・3・1項で考察する。多数の可視化実験から、流路側壁近傍の境界層はわずかに厚くなるだけで、速度一定の領域の広いことがわかった。これはLBが静止状態から動き始めるので、上面から見た速度分布は発達領域にあるためと考えられる。

3・3 PIVによるLBの内部速度分布の計測

LBの内部速度場の計測に、種々のPTV(Particle Tracking Velocimetry)やPIVを試みた。その結果、レーザ光による微粒子の散乱光分布の画像を使った輝度分布相関法が適していることがわかった。相関係数は文献(17)にあるものを使用した。撮影された画像は流路高さ方向の長さ1.2 mmを400 pixelとし、Interrogation areaは32 pixel×32 pixelとした。測定精度を上げるために、サブピクセル精度で相関係数の最大値の座標を決めた。すなわち、相関係数の値は、着目点と隣接する四つの格子点上の値を使って放物分布に近似され、最大値をとる座標がサブピクセル精度で決定される方法⁽¹⁷⁾を採用した。

3・3・1 側面から見た流路中心軸上の速度分布

$S=300 \text{ mm}^2$ 、初期位置 $X_{d0}=190 \text{ mm}$ の場合、 $X=114\sim 116 \text{ mm}$ で撮影された画像を用いて内部流動を計測した。LB長さ(X_u-X_d)はUI近傍の計測時で約25 mmであった。速度分布の測定では、粒子の写り具合から界面位置を特定した。UIの形状は円弧と仮定して以下の図で描かれている。

(1) 上流界面近傍 流路中心軸を含む X - Z 断面におけるUI近傍の絶対速度ベクトルを図10に示す。そのベクトルから、平均界面速度ベクトルを引い

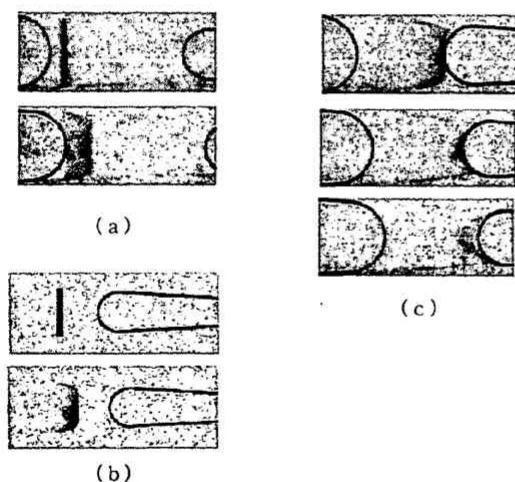


Fig. 9 Visualization of inner flow from the top using Photochromic dye activation technique

た相対速度分布の一部分を図11(a)に示す。 X - Z 断面におけるLB内部流動は、 $Z=0$ の上部では反時計回りで、その下部では時計回りの一対の大きな渦流れが存在していることがわかる。また、液速度はUIから離れると界面速度より速いこともわかる。

(2) 下流界面近傍 同様なDI近傍の相対速度の分布を図11(b)に示す。UI近傍の場合と同様に反時計回り一対の大きな渦流れが存在している。また、界面に沿った流れはその近傍に限定されており、DI

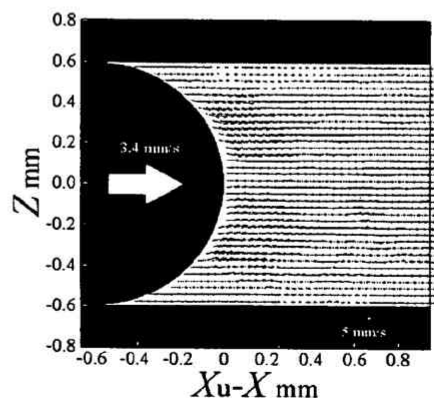
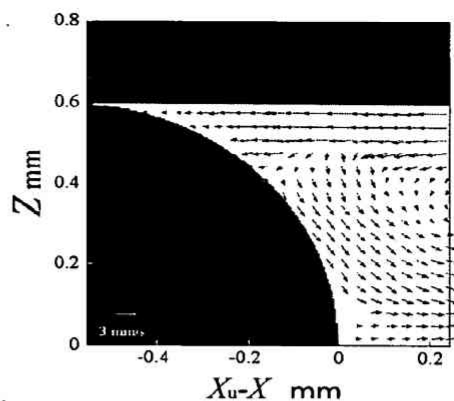
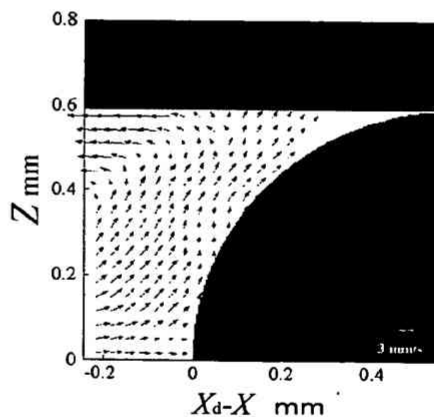


Fig. 10 Absolute velocity field in the liquid bridge



(a) in the vicinity of upstream interface



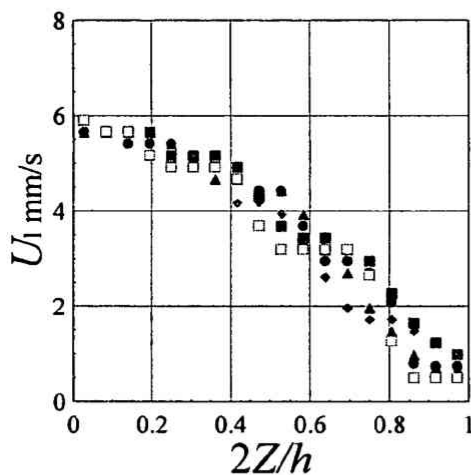
(b) in the vicinity of downstream interface

Fig. 11 Relative velocity fields in the liquid bridge

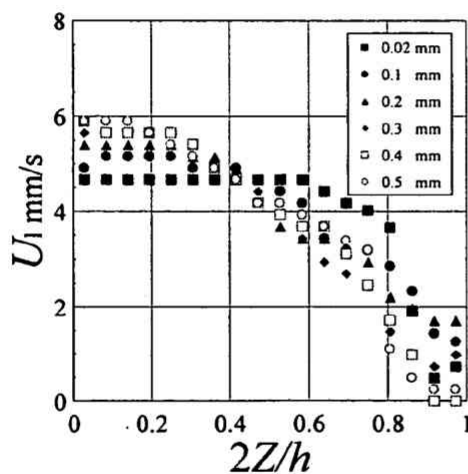
近傍まで液が軸方向に向かって流れる特徴を有していることがわかる。3・2・2項の図9(c)においてDIの界面形状に似た着色部が残ったのは、着色液がこの流れによって上下の流路壁面に運ばれ、そこに付着したためと考えられる。図9(c)の写真から、流路中心軸以外の X - Z 断面でも、図11(b)と同様な流れ場となっていることがわかる。DI近傍で速度ベクトルの空白のところがある。本研究の撮影方法では界面と流路壁面の交差する領域では光の反射によって粒子の散乱光分布が写らない場合もある。界面形状や粒子の撮影方法に蛍光粒子やフィルタを使うなど改善の必要がある。

3・3・2 側面から見たLB内の X 軸方向速度 U_i の分布

(1) 界面から離れた位置 UIとDIの X 方向の中間近傍について0.5 mmごと4箇所でのPIVによって測定された流路中心軸を含む X - Z 断面の U_i の



(a) in the middle region



(b) in the vicinity of the downstream interface

Fig. 12 Velocity profiles between the upper and lower walls along the central axis

分布を4種類の記号で横軸の無次元流路高さ $2Z/h$ (流路高さの半値で無次元化)に対して図12(a)に示す。速度分布はその場所ではUIとDIの影響を受けないため、放物形を示している。これは図8(b)の可視化結果と定性的に同じである。

(2) 下流界面近傍 DIの位置 X_d から上流に向かって0.02, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 mm離れた場所における同様な U_i の分布を図12(b)に示す。その分布は、 X_d から0.02 mm離れた場所において、 $2Z/h=0\sim0.6$ の範囲でほとんど一定だが、 X_d から0.4~0.5 mm離れると放物形になっている。すなわち、 X_d から約0.5 mm離れると、 U_i の分布はDIの影響をほとんど受けなくなることがわかる。

(3) 上流界面近傍 図は省略するがUI近傍においても X_d から X 方向に約0.5 mm離れると、 U_i の分布はUIの影響を受けなくなった。すなわち、LBの軸方向長さ($X_u - X_d$)の約25 mm内部 X - Z 断面において、UIの位置 X_u から軸方向約0.5 mmの範囲以外では U_i の分布は、UIの影響を大きく受けないことがわかった。

3・4 LBの挙動 S 一定で初期位置 $X_{d0}=118, 147, 178$ mmの場合、LBの下流界面位置($X_{d0} - X_d$)の変化を経過時間に対して図13に示す。LBは X_{d0} が小さいほど、すなわち、DIの初期位置が下流にあるほど、速く移動することがわかる。ところで、本研究の液体ではLBの界面が凹形状であるために、その内部は負圧になっている。LBがUIで空気圧力によって受ける下流向きの力は、LBの接している流路側壁から受ける反作用の上流向きの力(LB内部が負圧のためにより小さくなる)とDIで空気圧力によって上流向きに受ける力の和より大きいので、結果としてLBは下流に向かって動く。 X_{d0} が下流になるほど、曲率半径が小さくなりLB内部圧力が低くなるため

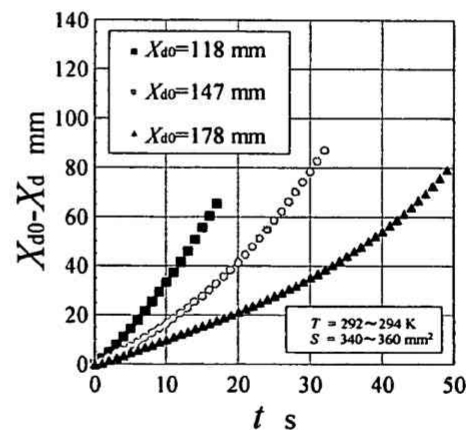


Fig. 13 Effect of the initial location of liquid bridge on the behavior

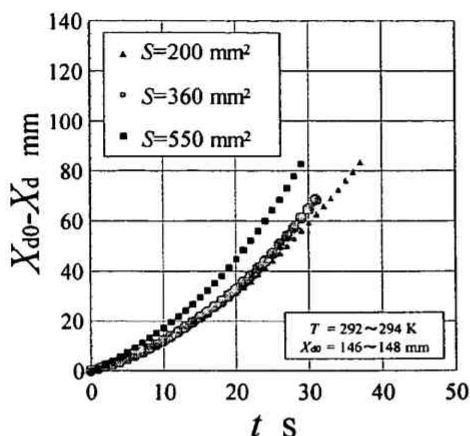


Fig. 14 Effect of the projected area of liquid bridge on the behavior

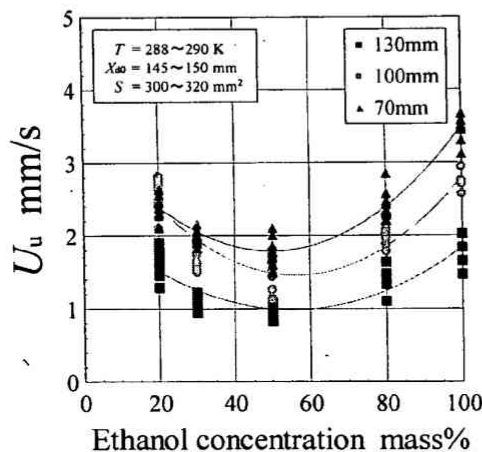


Fig. 15 Effect of ethanol concentration on the upstream interfacial velocity

に、LBの速度が速くなると考えられる。なお、この説明では界面と管路側壁の間に液膜が存在しており、前報⁽²⁾と同様に、エタノール液を扱っているので、文献⁽¹⁸⁾から界面と固体表面の接触角を 0° としている。

X_{d0} を一定にして $S=200, 360, 550 \text{ mm}^2$ の場合、同様な結果を図14に示す。図14より S が変化しても、LBの移動速度に大きな差が見られないことがわかる。 S の広いほうがLBに働く X 方向の力は大きくなるが、流動抵抗も増えるので、本実験範囲では移動速度に大きな差が表れないと考えられる。

図15にはエタノールと純水の混合液からなるLBの実験結果について、測定位置 $X=130, 100, 70 \text{ mm}$ (図15中の記号)における、UIの速度($U_u = dX_u/dt$)がエタノールと純水の質量比を横軸にとって示されている。なお、実験条件は、LBの $S=300\sim 320 \text{ mm}^2$ 、DIの初期位置 $X_{d0}=145\sim 150 \text{ mm}$ とし、各条件の実験を5回行い、その平均をその濃度の速度とした。

図15より U_u は、エタノール濃度が20~40%まで増加するにつれ低下し、その濃度が80~100%までは増加するとともに増大する。エタノールと水の混合液の場合、接触角はエタノール濃度の増大とともに低下することが知られている⁽¹⁸⁾。前者の濃度変化では、水の割合が低下するために表面張力の減少のほうが支配的となってLBの速度が低くなると考えられ、後者の濃度変化では接触角の減少のほうが支配的となって曲率半径が小さくなりLBの速度が増加すると考えられる。

4. 結 言

本研究では、ガラス製の管路高さ1.2 mmの水平な矩形縮小管路内に管路壁面がぬれた状態で移動しているエタノールの液体ブリッジ(LB)の気液界面形状全体および内部速度場についてキャピラリ数 $Ca=(1\sim 3)\times 10^{-4}$ で定量的に測定した。本実験範囲で得られたことは次のとおりである。

(1) 上面から見た上流側界面の曲率半径は、巨視的には接触円モデル⁽¹⁾で近似できる。しかし、下流側界面の曲率半径は接触円モデルのそれより大きい。

(2) 側面から見た上流と下流の界面形状全体は、第1近似として曲率半径が管路高さの半分の円弧とみなせる。より詳細に調べるために界面形状がフーリエ係数を使って表された。その結果、両方の気液界面形状は、管路(X 軸)方向が短軸となるだ円に似ている。フーリエ係数の考察から、界面形状について、両者の鉛直方向(Z 方向)の長軸長さを合せると、下流界面形状の短軸は上流のそれより短い。

(3) 側面から見た狭いすきまにおける最大6 mm/s程度の速度分布は、レーザ光の微粒子による散乱光分布の画像を使った輝度分布相関法(PIV)によって測定できることが確認できた。

(4) PIVの測定結果から、側面から見た X 方向速度分布は気液界面近傍を除くと放物形をしており、相対速度の観点から、LBの内部の管路中心軸を含む $X-Z$ 断面には、 X 軸に対して上下に軸対称の一対の大きな循環流れが存在している。フォトクロミックダイ法による可視化から管路中心軸以外の $X-Z$ 断面でも同様な流れが存在していることや上面から見た流れ場を明らかにした。

(5) LBの移動速度は、体積一定の場合、初期位置が下流に位置するほど大きい。また、同じ初期位置の場合、その体積によるLB速度への影響は小さい。

(6) 本研究範囲でエタノールと水からなるLBの移動速度は、エタノール濃度が20~40%に増加するに

つれ遅くなり、80～100%への増加に伴い速くなる。

文 献

- (1) 太田淳一・藤井照重・額光幸・山本富士夫, 機論, 61-581, B (1995), 201-207.
- (2) 太田淳一・山本富士夫・額光幸, 機論, 62-597, B (1996), 1884-1890.
- (3) 例えば, Handique, K., Burke, D., Mastrangelo, C. and Barns, M. A., *Solid-State Actuator Workshop*, (1998), 346-349.
- (4) Bernadiner, M. G., *Transport in Porous Media*, 30 (1998), 251-265.
- (5) Slattey, J. C., *Interfacial Transport Phenomena* (1990), 286-317, Springer-Verlag.
- (6) 宮本宜彦・片岡勲, 混相流, 14-1 (2000), 巻頭.
- (7) Ichikawa, N., Misawa, M., Ford, M., Tada, T. and Kawaji, M., *Proc. 3rd Int. Conf. Multiphase Flow*, (1998), 1-8 (CD-ROM).
- (8) Kistler, S. F., (Berg, J. C., ed.) *Wetability*, (1993), 311-429, Marcel Dekker, Inc., New York.
- (9) Dussan, E. B., Rame, E. and Garoff, S., *J. Fluid Mech.*, 230 (1991), 97-116.
- (10) Stoev, K., Rame, E., Leonhardt, T. and Garoff, S., *Phys. Fluids*, 8-8 (1998), 1793-1803.
- (11) Stemme, E. and Stemme, G., *Sens. Actuators A*, 39 (1993), 159-167.
- (12) 生水出淳史, 福井大学修士論文, (1999).
- (13) Santiago, J. G., Wereley, S. T., Meinhart, C. D., Beebe, D. J. and Adrian, R. J., *Proc. 8th Int. Symp. Flow Visualiz.*, Sorrent, Paper No. 96 (1998), (CD-ROM).
- (14) Dembek, G., *Proc. 2nd Int. Symp. Flow Visualiz.*, (1980), 537-577.
- (15) 小野周, 表面張力, (1980), 48-51, 共立出版.
- (16) 丹慶勝市・ほか3名訳, ニューメリカルレシピ・イン・シー (C言語による数値計算のレシピ) (1994), 395, 技術評論社.
- (17) Raffel, M., Willert, C. E. and Konpennhans, J., *Particle Image Velocimetry—A Practical Guide—*, (1998), 129-136, Springer-Verlag.
- (18) Weislogel, M. M. and Ross, H. D., *Microgr. Sci. Technol.*, III-1 (1990), 24-32.